

アンカーの引抜き抵抗実験

中央大学 理工学部 服部 昌太郎

1 まえがき

海洋構造物が外洋域に建造するに従って、浮遊形式の構造物が多く使用される傾向が強まる。係留システムによって、浮遊型構造物が海上または海中の、ほぼ一定に固定される場合、浪などによる構造物の動揺とアンカーケーブル系の挙動、およびアンカーケーブルの固定点となる、アンカーの引抜き抵抗カとが重要な問題となる。これらの問題の中で、アンカーの引抜き抵抗カとその発生機構に関しては、未だ十分な説明がなされていない。

海洋積造物のアンカーは、その自重に較べて引抜き抵抗力が大きく、しかも設置と撤去が容易に行える必要がある。この事は、海洋積造物用のアンカーの機能が、船舶用のものと異なることを意味している。

本研究は、沈設アンカーの引抜き抵抗力の発生機構を説明するための基礎として、沈設アンカー上部の海面回復の引抜き抵抗力への寄与を知る上に必要な、応復内に発生するすべり面形状とそこに働く剪断力について検討を行ったものである。

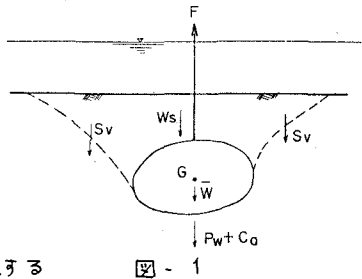
沈設アニカーの引抜き抵抗力 (Breakout force) についてなされた、従来の研究は非常に数が少ない。海底面下に沈降した物体を引抜くに必要な力は、物体の形状・大きさに、海底土質の性質、沈降深さ、海底下に放置された時間、そして引抜き荷重の特性とその作用位置などに関係する。この事は、NECLで行っている一連の研究によって、明らかにされた事柄である。⁽¹⁾⁽⁴⁾

海洋構造物用の沈設アンカーの引抜き抵抗カに關する研究としては、釧路などの基礎の引抜き抵抗カに關する研究が、土質工學の分野で行われている。

土中基礎の引抜き抵抗力の算定方法としては、

1. アンカー直上の円柱土塊の重量とすべり面（円柱面）に作用する剪断力との和（earth pressure method）.
2. アンカー上面端より傾角が $90^\circ + \varphi$ （ φ : 摩擦角）をなす円すい面とすべり面とし、この部分の土塊重量と抵抗力とする。（earth load method）
3. Balla・松尾の方法

がある。Ball⁵⁾ と松尾⁶⁾ は、アンカーの引抜き抵抗
力 q 、Terzergy の支持力の式と同等な式で与えら
れるとして、それぞれ円錐または直線と対数らせん
とを仮定し、すべり面工の土塊重量 W 、すべり面に作用す
る剪断抵抗合力 T の鉛直分力 T_v とアンカー重量 W_a との和とし
て、理論式を与えている。



2. 予備的考察

図-1に示すように、沈設アンカーと鉛直に引抜く場合の、抵抗力の成分とそれに係

因子は以下の様である。

1. アンカー水中重量 G
2. アンカー上の底床重量 W_s
 $W_s = W_s(A_m, L, b, r_s', c, \varphi, D)$
3. アンカー下面に働く吸引力 (suction force) P_w
 $P_w = P_w(A_m', dF/dt, d\sigma, e, k, D, h, t)$
4. すべり面に働く剪断力の鉛直成分 S_v
 $S_v = S_v(A_m' L, r_s', c, \varphi, D)$
5. アンカー表面に働く粘着力・摩擦力 C_a
 $C_a = C_a(A_m' L, b, r_s', \mu_s, c, e, dF/dt, t)$

γ : 土, A_m , L , b : アンカーの最大水平投影面積
 γ : 土の鉛直方向の代表寸法, $\delta'_s = (\delta_s - \delta_w) /$
 $(1 + e)$: 底層の水中にある見掛けの単位体積重量,
 c, φ : 底層の粘着力と内部摩擦角, d_o : 底層の平均
 粒径, μ_s, e : 底層の粘性係数と間隙率, ε : アン
 カーの表面粗度, D : 沈没深さ, t : 時間

いま、沈設アンカーの引抜き抵抗力として、引抜き荷重とアンカー水中重量との差 $F - G$ とすると、

$$R = F - G = W_n + P_w + S_v + C_n$$

$$= (A_m, L, b, \tau_s', c, \varphi, e, k, do, \frac{dF}{dt}, h, \varepsilon, D, t)$$

(1)

せうる。

次設アニカーの引抜き抵抗力 R は、(1)に見られるように非常に数多くの因子に關係する。本研究は、先

きに述べたように、(1)中の W_s と S_v の引抜き抵抗
力 R に対する効果を把握することを目的としている。
そこで、本研究では以下に掲げる理由から、実験に使用
する模型底質として砂を用い、実験条件の単純化を
計る。

1. 砂は粘性土に較べて粒径が大きく、付着力はほとんどない。
2. 砂の透水係数が大きいので、アンカー下面に発生
する吸引力は、比較的速やかに解消される。
3. 砂は粘着力はほとんどない。
4. 模型アンカー沈設時の、アンカー周辺土の攪乱に
よる強度低下の回復が速やかで、しかも底質の堆積状
態の均一性と再現性が良い。

以上のような本研究での条件と考慮すると、(1)は
非常に簡単となり、次式で与えられる。

$$f(R, A_m, L, b, r_s', \varphi, D) = 0^* \quad (2)$$

そして、(2)より次元解析によって、(3)となる。

$$\frac{R}{r_s' A_m D} = f\left(\frac{D}{L}, \frac{b}{L}, \varphi\right) \quad (3)$$

つまり、半径 B の円板状のアンカーに対する、Balla
と松尾の式で、それぞれ(3)の形式に書き直したものが
(4)と(5)である。

$$\frac{R}{r_s' A_m D} = \frac{\lambda^2}{\pi} [F_1(\varphi, \lambda) + F_3(\varphi, \lambda)], \quad (\text{Balla の式}) \quad (4)$$

$$\frac{R}{r_s' A_m D} = \frac{1}{\pi} (\alpha_4 \lambda^2 + \alpha_5 \lambda + \alpha_6), \quad (\text{松尾の式}) \quad (5)$$

ここに、 $\lambda = D/B$ 。

3. 実験装置と実験方法

実験は、断面 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 、高さ 2m の水槽を使用して
行った。この水槽は、アンカー引抜き時の挙動と、直
接観察・記録するため、水槽の上部 1m の部分は、4
側壁をすべて透明プラスチック製とした。模型海底々
質としては、表-1に示されるような諸性質をもつ、
豊浦標準砂を使用した。

表-1 実験に使用した底質の諸性質

平均粒径	比重	内部摩擦角	間げき率	見かけの単位重量
220 μ	2.63	33° 42'	39.1%	1.17 g/cm ³

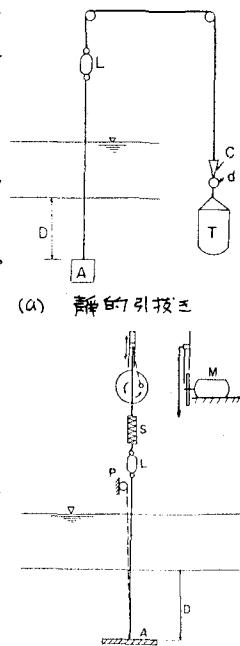
*) (2)を真似くにあてて、 $dF/dt = \text{const.}$ の条
件下で実験を行うことを考慮して、その効果を無視し
た。

模型アンカーは、直立体、球、正方形、円板および
矩形板の5形状で、それぞれの寸法、重量は表-2に示
される。模型アンカー寸法

形状	寸法	水中重量
直立体	7.0 ^{cm} × 7.0 ^{cm} × 7.0 ^{cm}	2.48 kg
球体	8.0 cm ϕ	1.72 kg
正方形板	25 ^{cm} × 25 ^{cm} × 8 ^{mm}	3.80 kg
円板	10.7 ^{cm} × 10.7 ^{cm} × 8 ^{mm}	0.70 kg
矩形板	12 ^{cm} × 8 ^{cm} × 8 ^{mm}	0.60 kg
矩形板	15.2 ^{cm} × 7.5 ^{cm} × 8 ^{mm}	0.75 kg

は、図-2に示す。引抜き荷重を静的に作
用させる実験装置は(a)に示
される。模型アンカー(A)
は、ステンレス・ワイヤーで
引抜き荷重用(T)に連結され、
その間に力計(L)とバランス
用錘(C)が挿入されている。

アンカーに作用させる引抜き
荷重は、定水頭式水槽より水
槽(T)に送水される水によっ
て載荷し、荷重は力計(L)に
よって検出する。沈設アンカ
ーの変位は、ダイヤルゲージ
(d)または、図-2 bのよう
にポテンシオメータによつて
検出する。動的引抜き荷重に
よる実験は、図-2 bに示す
ように、1/4 HP の可変速モ
ーター(M)と動力源とする回転



(b) 動的引抜き
図-2 実験装置

板と模型アンカー(A)とを、引張り荷重索で結合し、
その途中にコイルバネ(S)と力計(L)を挿入する。

実験は、模型アンカーを所要の沈設深さに設置する
ため底面を掘下げ、アンカー設置後水面より砂を投
下して埋戻し、海面面を水平にする。模型アンカー周
辺の攪乱回復の強度を回復させるため、一定時間(予
備実験より1時間と決めた。)放置した後、引抜き荷
重を作用させて実験を行う。

4. 実験結果

図-3は、一様な引抜き荷重速度($dF/dt = \text{const.}$)
で、アンカーを引抜いた場合の、アンカーの変位、ア
ンカー下面中心部での吸引力、および引抜き荷重と時

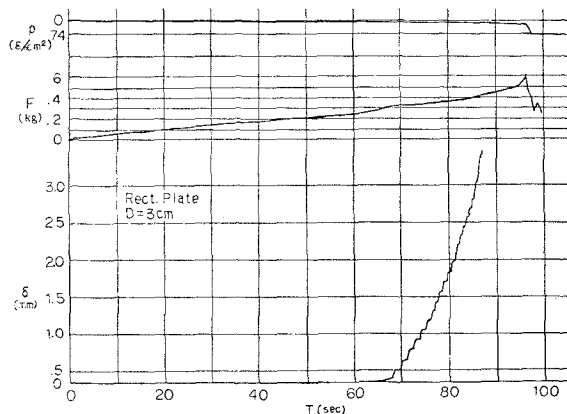


図-3 静的引抜き試験結果例

図との関係を示す試験結果の一例である。この図にも見られるように、一様な引抜き荷重速度でアンカーを引抜いた場合でも、アンカーの変位挙動は同様の傾向に変位することと示している。また、アンカー下面に発生する吸引力も小さい。引抜き荷重が増大し、或る引抜き荷重になると、アンカーの変位は急激に増大する。

そこで、本研究では図-4に示すような時定数の、アンカーに作用する引抜き荷重より、アンカーの最大引抜き抵抗力を求めることとする。

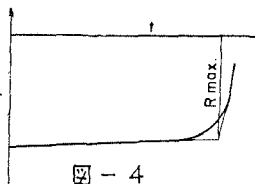


図-4

図-5は、アンカーの最大引抜き抵抗力と荷重速度との関係を検討するため、図-5 引抜き荷重速度と最大引抜き抵抗力に行った、実験結果の一例である。この実験結果より、静的引抜き試験での引抜き荷重速度は、400~600 g/minで行うこととした。

静的引抜き試験結果は、図-6に示される。この図は、アンカー最大引抜き抵抗力と沈設深さとの関係を示したものである。D=0、すなわちアンカー上面が海

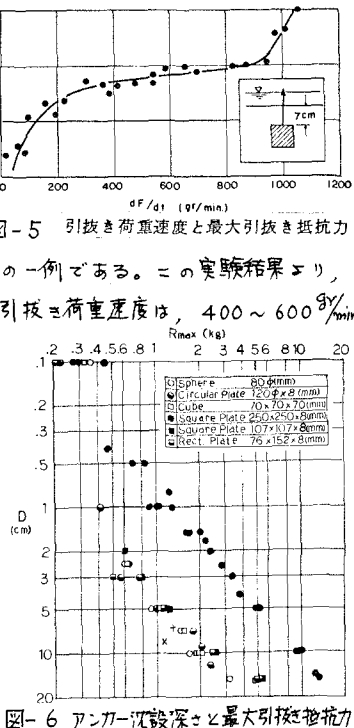


図-6 アンカー沈設深さと最大引抜き抵抗力

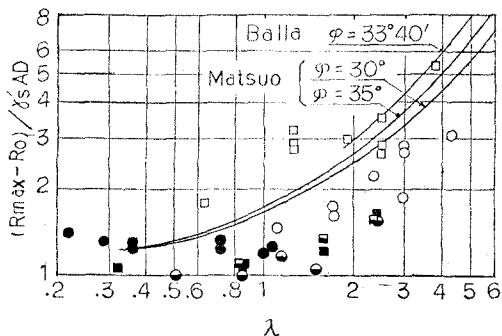


図-7 実験結果と理論との比較

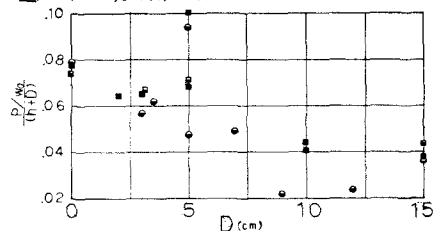


図-8 アンカー沈設深さとアンカー中心での吸引圧力 (H:水深)

底面と一致する場合のアンカー引抜き抵抗力は、アンカー表面に働く土圧による摩擦力などによって、比較的大きなものとなっている。

本研究は、沈設アンカー工事に生ずるすべり面内の、海底土質重量とすべり面に働く剪断力鉛直成分の、アンカー引抜き抵抗力への寄与の程度を解明することと目的としている。そこで、実験結果よりえられる $R_{max} - R_0$ (R_0 : $D=0$ のアンカーの最大引抜き抵抗力) が、(4)、(5) の R と等しいとして、実験結果と Balla および松尾の理論との比較を行ったものが、図-7である。この図の横軸は相対沈設深さ、また縦軸はアンカーの最大引抜き抵抗力とアンカー上部の海底土質重量との比で表わした、相対最大抵抗力である。また、図-8はアンカーの沈設深さと、アンカー中心での吸引力との関係を示したもので、本実験では吸引力の効果は、非常に僅かである。

図-7に見られるように、直方体および正方板アンカーの最大引抜き抵抗力は、球体、円板および矩形板のものより、若干小さくなっている。松尾が行った実験の結果でも、正方板アンカーの引抜き抵抗力が円板のものより10%程度大きいことが認められており、同様の傾向が本実験でも認められた。

線形引抜き荷重がアンカーに加えられる場合の実

験を行った。繰返し引抜き荷重の載荷方式は、アンカーの変位が 0.3 ~ 1 mm に達するまで引抜き荷重を連続的に増加させ ($dF/dt = 600 \text{ gf/min}$)、定変位に達した後全載荷の重を除く。

実験結果は、図-

9 と 10 に示される。

実験は、直方体と球体のアンカーについて行った。実験結果

にみられるように、

球体アンカー

の引抜き荷重

除去後の残留

変位は、直方

体アンカーの

ものに較べて

大きい。この事は、アンカ

ー変位にともなう生ずる、

アンカー下面の掘り込みへの

底層の流動が、球体アンカ

ーの場合により容易に行わ

れることを示している。

したがって、アンカー

下面に発生する吸引力

は、球体アンカーの方が

直方体アンカーに較

べて、速やかに解消す

ると思われる。

図-11 は、直方体

と球体のアンカーに

ついて行った実験結果より、アンカーの最大引抜き抵抗

力決定するための図である。これから図中に示すよう

な、繰返し引抜き荷重に対するアンカーの最大引抜き

抵抗力の定義より求めらる R_{max} と、図-6 中に示

すおよび $\times$ プットしてある。本実験での最大引抜き

抵抗力の定義より、静的引抜きと繰返し引抜きの場合

の、引抜き抵抗力の差違がつくことが、図-6 より

認められる。

動的な繰返し引抜き荷重を載荷した場合の実験結果

例が、図-12 に示される。

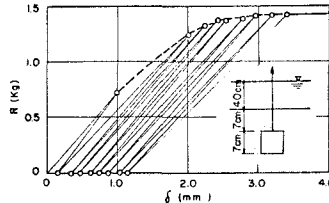


図-9 繰返し引抜き実験結果例

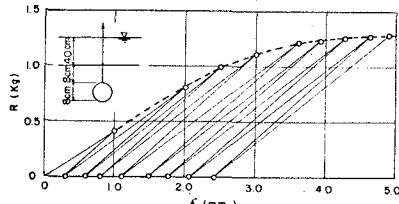
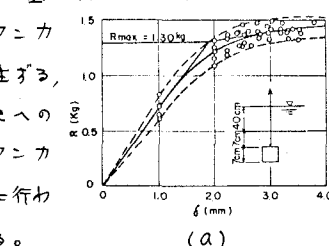
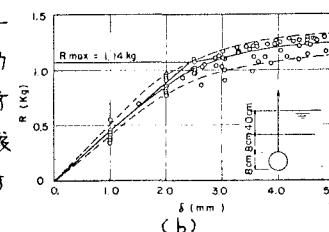


図-10 繰返し引抜き実験結果例



(a)



(b)

図-11 繰返し引抜き実験による最大引抜き抵抗力

図-11 は、直方体と球体のアンカーについて行った実験結果より、アンカーの最大引抜き抵抗

力決定するための図である。これから図中に示すよう

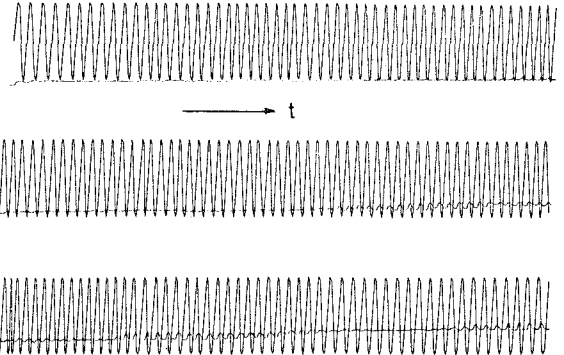


図-12 動的引抜き実験結果例(正方板)

($F_0 = 8.1 \text{ kg}$, $\Delta F = 3.4 \text{ kg}$, $T = 1.8 \text{ sec}$, $D = 4.0 \text{ cm}$)

載荷動的引抜き荷重は、

$$F = F_0 + \Delta F \sin \omega t$$

で与えられる周期的に変動するものである。

図-12 に見られるように、変動引抜き荷重載荷後の経過時間が、20 サイクル相当の時までは、アンカーの変位はほとんど認められない。そして、90 サイクル付近よりアンカーの鉛直変動が認められ、95 サイクル付近でアンカーは上へ 0.2 mm 程度急に移動し、その後は再び変位は小さくなる。このようなアンカーの変位変動の振幅値によって、アンカーは徐々に引抜きられ、アンカーの総変位が数 mm に達すると、急に変位量は増大する。

このような、アンカーの変位変動は、周期的な荷重変動によって生ずる微小なアンカーの揺動で、アンカー周囲の砂層が流動化し、このため地盤内の引抜き抵抗力が低下したために起るものと考えられる。

Seed⁸⁾によると、砂の液状化現象に関係するファクターは、1. 砂の粒径分布、2. 砂の相対密度(掘り込み比)、3. 初期拘束力、4. 地層の振動、5. 振動の継続時間 であらう。

従来の研究によると砂地盤の液状化現象は、粒径が均一の場合性、またゆるぎめの砂層発生し易いという、定性的な傾向が認められている。本実験での模型直交の粒径は、平均粒径が 200μ の比較的均一な粒径の砂で、しかも掘り込み率は 40 % のゆるぎめの砂層である。したがって、本実験の場合には周期的引抜き荷重によって、アンカー周囲の砂が流動化する可能性は、きわめて大きかったと言える。

砂の流動化現象には数多くの要因が関係するため、

今後数多くの実験の積重ねによって、アンカー周辺での砂の流動化現象とアンカーの変位挙動の関連を検討することが、必要であると考えられる。

5. まとめ

沈設アンカーの引抜き抵抗力の発生機構を説明するため、6種類のアンカーについて模型実験を行った。

沈設アンカーの引抜き抵抗力については、従来の研究は少なく、引抜き抵抗力の定性的な性質や組織式が発表されてきたにすぎない。しかも、引抜き抵抗力の発生機構について、系統的な研究がなされていないため、定量的な引抜き抵抗力の推定は、現在でもほとんど分らないものとなっている。以上のよう、沈設アンカーの引抜き抵抗力の定量的推定の不十分を克服するため、本研究はアンカー引抜き時に海底の底面に生ずるすべり面形状と、その面上に働く剪断力および土壌重量について、基礎的な検討を行ったものである。

本研究の範囲内で認められた、主たる事柄は以下のようである。

1. アンカーの引抜き抵抗力は、荷重程度の増加とともに、増大する。これは、アンカー下面に発生する吸引力 (suction force) に起因する。
2. アンカーの変位-時間曲線より、図-4のように、静的引抜き荷重に対するアンカーの最大引抜き抵抗力を定義すると、図-6に示すように、アンカーの沈設深さに比例して、最大抵抗力は増大する。
3. アンカーの沈設深さが大きい場合には、Ballu と松尾の理論値と実験値とは、ほぼ同様の傾向を示し、直方体アンカーは球体アンカーより大きい抵抗力を示す。また、沈設深さが浅い場合には相対最大抵抗力は、沈設深さによってあまり変化しない。しかし、このような場合でも、直方体アンカーの最大抵抗力は、他の形状のアンカーより大きい。
4. 球体アンカーの引抜き抵抗力が直方体および正方体アンカーより小さいことは、アンカー引抜き時に発生する海底の底面のすべり面が、アンカーの最大水平面積の周囲より発生していることに起因する。以上のことから、沈設アンカーの形状としては、アンカー周辺部が鋭角端であることが望ましい。
5. 正方体、円板および矩形板アンカーの実験結果

より、アンカーの最大水平面積が同じ場合には、アンカーの引抜き抵抗力は、アンカーの周辺長が長いもの程大きいことが認められた。

6. 静的反引抜き荷重を受けるアンカーで、球体アンカーの残留変位は、直方体アンカーより大きい。これは、アンカー下面に発生する吸引力の解消が、球体アンカーの場合は直方体アンカーに較べて、速やかに行なわれることを意味している。

7. 動的引抜き荷重を受けるアンカーの引抜き挙動は、アンカー周辺の底面の流動化が、大きな原因となると認められる。

6. 謝 辞

本研究はこの数年間継続しているもので、昭和48年度には、建設省の総合技術開発プロジェクトの一環として行なった、「波浪観測ステーション調査」(代表者本間 仁教授)より研究費の補助を受けた。

引用文献

- 1) Liu, C.L.: Ocean sediment holding strength against breakout of embedded objects, Tech. Rept. R635, U.S. Naval Civil Eng. Lab., 1969.
- 2) Muga, B.J.: Bottom breakout forces, Proc. of 2nd Conf. on Civil Eng. in the Oceans, ASCE, pp. 105~116, 1969.
- 3) Vesic, A.S.: Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom, Proc. of 2nd Conf. on Civil Eng. in the Oceans, ASCE, pp. 137~165, 1969.
- 4) Bembem, S.M. and E.H. Kalajian: The vertical holding capacity of marine anchors in sand, Proc. of 2nd Conf. on Civil Eng. in the Oceans, ASCE, pp. 117~136, 1969.
- 5) Ballu, A.: The resistance to breakout of mushroom foundation for pylons, Proc. of 5th Intern. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, pp. 569~576, 1962.
- 6) 松尾 俊: 送電用鉄塔基礎の引揚抵抗力について、土木学会論文集, オ105号, pp. 9~18, 昭和39年.
- 7) 松尾 俊・新城俊也: 粘性土中の基礎の引揚抵抗力に関する研究, 土木学会論文集, オ137号, pp. 1~12, 昭和45年.
- 8) Seed, H.B. and I.M. Idriss: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Proc. ASCE, Vol. 97, SM, pp. 1249~1273, 1971.